

**New Technology and the Basic  
Theory of Spinning-penetration for the  
Strength of Rock and Soil**

# 地下岩土体强度旋压触探 基础理论与新技术

吕祥锋 杨东波 冯志 张爱江/著



科学出版社

中央引导地方科技发展专项 (Z161100004516014)

国家自然科学基金青年科学基金 (51504029)

北京市科技新星计划 (Z161100004916083)

# 地下岩土体强度旋压触探 基础理论与新技术

New Technology and the Basic  
Theory of Spinning-penetration for the  
Strength of Rock and Soil

吕祥锋 杨东波 冯志 张爱江 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书详细介绍了地下岩土体病害探查技术的发展水平,分析了目前国内  
外探查技术存在的主要问题,提出了微损旋压钻进触探新方法,研发了地下  
岩土体强度微探仪系统装备,并在试验病害段、现场测试区段等重要工程应  
用测试取得成功应用。研究成果为地下岩土体强度原位快速精细测试提供了  
重要的科学依据和新技术方法。全书共 9 章,主要内容包括地下岩土体强度  
探测研究现状、道路地下病害及塌陷发生机理、地下病害探测方法及优化、  
地下岩土体强度微损旋压触探理论、道路地下病害微损精细探测技术、道路  
地下病害试验段探测应用研究、某广场地下病害精细探测技术应用、城市道  
路地下疏松病害微损定量探测技术应用、地下管线周边病害微损精细探测技  
术应用等。

本书可供从事土木建筑工程、岩土工程、地下工程与隧道等专业的科研  
人员、设计和施工人员,以及高等院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

地下岩土体强度旋压触探基础理论与新技术=New Technology and the  
Basic Theory of Spinning-penetration for the Strength of Rock and Soil / 吕祥  
锋等著. —北京: 科学出版社, 2017.5

ISBN 978-7-03-052405-8

I. ①地… II. ①吕… III. ①岩土工程-强度-研究 IV. ①TU432

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 054925 号

---

责任编辑: 李 雪 / 责任校对: 桂伟利  
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017 年 5 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017 年 5 月第一次印刷 印张: 8 1/2

字数: 171 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 作者简介

吕祥锋, 1982年出生于河北省广宗县, 2011年12月毕业于辽宁工程技术大学并获得工程力学专业工学博士学位, 2011年12月至2013年10月在中国科学院力学研究所力学博士后科研流动站工作, 现工作于北京市市政工程研究院岩土工程技术研究中心, 是中国力学学会会员和中国岩石力学与工程学会高级会员。

主要从事城市地下生命线工程减灾理论与控制技术等方面的科研工作。主持中央引导地方科技发展专项1项、国家自然科学基金青年科学基金项目1项、国家重点实验室开放基金项目1项、北京市科技新星计划项目1项、北京市优秀人才培养资助项目1项、北京市西城区优秀人才培养资助项目1项、北京市西城区可持续发展项目1项、北京市交通委路政局科研项目1项、北京市政路桥集团公司技术创新项目1项、北京市市政工程研究院重点科技攻关项目1项, 作为研究骨干参加国家“973”计划项目2项、国家自然科学基金项目4项、北京市优秀创新团队项目1项、北京市科技计划重点项目1项, 省部级及企业合作项目10余项。

近5年来, 在国内外重要期刊上公开发表学术论文50余篇, 其中, SCI、EI收录30篇, 由科学出版社出版著作1部, 编写《北京市城市隧道养护管理办法》1项, 获国家专利授权35项, 其中, 国家发明专利18项; 是国家自然科学基金项目函评专家, 国际SCI期刊“*Theoretical and Applied Fracture Mechanics*”、“*Shock and Vibration*”及“*Materials Research Innovations*”邀请审稿人, 英文科技期刊“*Petroleum*”邀请审稿人, 《山东科技大学学报》(自然科学版)审稿专家和《西南石油大学学报》(自然科学版)审稿专家; 荣获《岩石力学与工程学报》创刊30周年青年优秀学术论文奖, 获2015年中国煤炭工业科学技术一等奖, 2013年中国职业安全健康协会科学技术奖二等奖1项、三等奖1项, 获2013年辽宁省教育厅优秀科研成果奖1项。博士论文被评为中国岩石力学与工程学会优秀博士学位论文。入选2014年北京市优秀人才和2016年度北京市科技新星计划。

主要研究方向包括岩土体强度原位测试理论、微损触探新方法和地下病害快速精细探测技术。

## 前 言

由于城市地下资源开发规模和地下空间建设难度不断加大,尤其是城市“生命线”的地下管线错综复杂,管线周边土体病害或年久失修等,存在很大安全隐患,甚至成为居民的“夺命线”。统计数字显示,2009~2013年,全国直接因地下管线事故而发生死伤的事故共27起,死亡人数117人,事故起数及伤亡人数均呈增长趋势。据不完全统计,2007年北京道路塌陷事件54起,2008年94起,2009年129起,2012年仅“7.21”主城区就发生99起道路塌陷事件。近年来,城市道路塌陷事件呈逐年递增趋势,且从主干线逐渐向非机动车道和人行步道发展,破坏范围继续扩大。道路地下病害诱发塌陷与地下岩土体强度直接相关。地下岩土体强度原位测试理论、方法和技术引起了岩土工程相关科研人员和技术人员的广泛关注。笔者自2009年攻读博士学位开始,就一直从事地下岩土体强度原位测试技术相关的研究工作,2012年、2013年在中国科学院力学研究所从事博士后研究工作,主要完成了地下岩土体原位测试原理和新技术研究工作。依托中央引导地方科技发展专项、国家自然科学基金青年科学基金项目 and 北京市科技新星计划项目,研究了地下岩土体强度原位测试理论,提出了地下管廊周边土体松散层及脱空隐患精细探查方法,研制了国内首台地下土体密实度微探仪,开发了国内首套管廊周边疏松病害实时诊断系统,建设性提出分级预养安全管控措施,实现了地下管廊病害快速、精准探查和实时诊断应用。

地下病害的发展受到外界各类因素的影响,在多种交互因素作用下地下病害诱发塌陷发生,地下岩土体强度是发生塌陷的重要影响因素,快速、准确获取地下岩土体强度指标对于及时预防道路地下塌陷事故至关重要。地下岩土体强度原位探测无论在理论、试验还是测试技术方面都是非常复杂的课题。本书总结课题组在地下岩土体强度原位探测理论及技术方面的研究成果,重点阐述了地下岩土体强度微损旋压触探理论以及道路地下病害微损精细探测技术和应用,结合工程实例资料,归纳总结微探新技术应用研究成果。

本书的出版得到了辽宁大学潘一山教授,辽宁工程技术大学梁冰教授、王来贵教授,中铁二十二局集团第四工程有限公司总工程师白子斌高级工程师,中交路桥技术有限公司崔玉萍教授级高工,西南石油大学刘建军教授,中国科学院武汉岩土力学研究所薛强研究员,北京市勘察设计研究院有限公司周宏磊教授级高工,建设综合勘察研究设计院有限公司傅志斌教授级高工和中国科学院力学研究

所刘晓字副研究员、冯春高工的悉心指导，部分研究内容得到课题组和实验室各位同事的大力支持与帮助。在研究过程中，得到了辽宁工程技术大学徐连满博士、王爱文博士、唐治博士和北京市市政工程研究院刘冰玉助理工程师、周宏源硕士研究生、张硕硕士研究生的帮助；在现场测试技术研究方面，得到了中电建路桥集团有限公司欧阳韦高工、刘勇教授级高工、梁喜明工程师和北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司张鹤工程师、卢开艳工程师、孟林工程师的支持。在本书编写过程中，得到了北京市市政工程研究院张毅教授级高工、王贯明教授级高工、叶英研究员、崔丽教授级高工和北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司姜宏维总经理、彭国荣高工、田春燕总工、李东海教授级高工、牛晓凯高工、贺美德高工的帮助。在此，对他们表示诚挚的感谢。

感谢科学出版社编辑做了大量细致的工作，使得本书得以顺利出版。限于水平，书中不妥之处，请读者批评指正。

吕祥锋

2017年1月

# 目 录

## 前言

第 1 章	地下岩土体强度探测研究现状	1
1.1	岩土体原位强度探测研究现状	1
1.2	地下岩土病害探测方法研究现状	2
1.3	地下病害定量精细探测技术研究现状	3
第 2 章	道路地下病害及塌陷发生机理	4
2.1	道路地下病害类型	4
2.1.1	基层	4
2.1.2	岩土地基	4
2.1.3	特种土层的路基	5
2.2	地下塌陷危害及类型	5
2.3	道路地下塌陷机理	7
第 3 章	地下病害探测方法及优化	8
3.1	地质雷达探测法	8
3.2	地震映像探测法	9
3.2.1	主要特点	9
3.2.2	适用范围	9
3.3	地质钻孔取心法	9
3.3.1	主要特点	9
3.3.2	适用范围	10
3.4	地下病害探测方法优化原则	10
3.4.1	准确性原则	10
3.4.2	效率性原则	10
3.4.3	经济性原则	10
3.5	道路地下病害探测优化选取	11
第 4 章	地下岩土体强度旋压触探理论	12
4.1	旋压触探理论基础	12
4.1.1	工作原理	12
4.1.2	系统组成	13

4.1.3	组分功能及相关参数	14
4.2	微损旋压触探力学分析	18
4.2.1	尖齿剪切体受力分析	18
4.2.2	尖齿钻头破岩力学分析	20
4.2.3	旋压钻进扭矩与强度关系	22
4.3	地下岩土体强度测试验证	39
4.3.1	强度测试方法及步骤	39
4.3.2	测试验证结果分析	39
4.3.3	强度测试对比验证	43
<b>第 5 章</b>	<b>道路地下病害精细探测技术</b>	<b>44</b>
5.1	地质雷达和地震散射普探	44
5.1.1	地质雷达探测	44
5.1.2	地震散射探测	47
5.2	微损旋压触探力性详探	48
5.2.1	旋压触探测试原理	48
5.2.2	旋压触探测试方法	49
5.2.3	旋压触探测试要求	49
5.3	数字钻孔图像物性详探	50
5.3.1	全景孔测数字系统	50
5.3.2	全景孔测数字成像原理	52
5.3.3	数字钻孔成像测试流程	55
5.3.4	全景孔测高精数字分析	56
5.4	道路地下病害精细探测程序	64
5.4.1	地下病害精细探测步骤	64
5.4.2	道路地下病害探测流程	65
<b>第 6 章</b>	<b>道路地下病害试验段探测应用研究</b>	<b>66</b>
6.1	地下病害试验段概况	66
6.2	地下病害探测线布置	66
6.3	病害试验段探测验证分析	67
<b>第 7 章</b>	<b>某广场地下病害精细探测技术应用</b>	<b>69</b>
7.1	广场工程概况	69
7.2	精细探测目的和内容	69
7.2.1	目的	69
7.2.2	内容	69



7.3	地质雷达扫描普探	70
7.4	微损触探精细详探	78
7.5	地下病害探测建议	82
<b>第8章</b>	<b>城市道路地下疏松病害微探定量探测技术应用</b>	<b>85</b>
8.1	东大桥路地下疏松病害精细探测	85
8.1.1	东大桥路病害状况	85
8.1.2	地质雷达扫描普探	85
8.1.3	微损触探精细详探	86
8.1.4	地下病害探测建议	89
8.2	建国路地下疏松病害精细探测	89
8.2.1	建国路(大望桥段)病害状况	89
8.2.2	地质雷达扫描普探	90
8.2.3	建国路主路探测结果	91
8.2.4	微损触探精细详探	91
8.2.5	地下病害探测建议	94
8.3	道路地下病害现场探测分析	94
<b>第9章</b>	<b>地下管线周边病害微损精细探测技术应用</b>	<b>95</b>
9.1	达智桥胡同管线工程概况	95
9.2	微损触探精细详探	96
9.2.1	探测方式和设备	96
9.2.2	探测结果	96
9.3	地下病害探测建议	119
	<b>参考文献</b>	<b>120</b>

# 第 1 章 地下岩土体强度探测研究现状

国内外学者在岩土体原位强度探测方面,形成了静力触探法、预钻式旁压测试法、野外十字板测试法和现场直剪试验方法以及钻孔取心等方法;在地下岩土体病害探查手段方面,形成了物探方法(探地雷达法、多道面波法、高密度电阻率法、基于 ohm mapper 的电阻率成像法)和现有原位强度探测方法相结合的技术手段<sup>[1~5]</sup>。然而,随着地下岩土工程问题不断复杂化,现有技术方法难以满足实际需求,有必要对现有探测方法和技术进行分析,进而寻求地下岩土体强度及病害定量探查技术发展的主要趋势。

## 1.1 岩土体原位强度探测研究现状

国内外学者在岩土体原位探测方面开展了许多研究工作,主要形成了静力触探法、预钻式旁压测试法、野外十字板测试法和现场直剪试验方法以及钻孔取心等方法,针对不同的工程参数测试,应用不同的测试方法,取得了较好研究成果<sup>[6~14]</sup>。

静力触探法可以间接得出土层的承载力、模量等地基基础设计参数。20 世纪 70 年代末,研制成功了孔隙水压力静力触探,可获得超静孔隙水压力的消散过程。预钻式旁压测试法是工程勘察中常用的原位测试技术,早期的旁压仪均为预先钻孔,这样就难免使孔壁土受到不同程度的干扰,并且一定程度地限制了测试深度。为了消除这些缺陷,研制了不同形式的自钻式旁压仪,其代表是法国的道桥式和英国的剑桥式。徐光黎等针对国内的勘察技术,研制了自钻式原位剪切旁压仪(self-boring in-situ shear pressuremeter, SBISP),经过试验和分析对比验证了装置的可行性。扁铲侧胀试验由意大利 Silvano Marchetti 首先提出,通过孔壁侧向扩张,根据压力与变形关系,测定土的模量和水平应力指数等指标。野外十字板测试是饱和软土地区常用的工程勘察仪器,其精度很高,可用于工程设计<sup>[15~17]</sup>。

通过岩土体强度原位测试研究现状分析可知,国内外学者在原位探测方面开展了大量研究,但以往的测试方法均存在一定的局限性,静力触探法对地区经验依赖较大,且适合于土类;预钻式旁压测试法只受到压力作用,没有考虑到岩土

体的剪切破坏；野外十字板测试方法仅适合于饱和的软土，对于岩土体的力学特性测试也是不合适的；原位直剪试验法向应力很小，不能反映实际的高应力状态，且测试数据具有滞后性。因此，研究城市道路易陷区路基疏松病害数字钻探精细诊断技术，为城市道路交通安全和塌陷应急抢险作出合理处置决策提供基础数据是非常必要的。

## 1.2 地下岩土病害探测方法研究现状

目前，道路地下病害探测多采用雷达方法或钻孔取心方法，探地雷达通过向地下发射宽频短脉冲高频电磁波，利用不同地下介质的电性特性及其分界面对电磁波的反射原理，通过分析来自地下介质的反射电磁波的振幅、相位和频谱等运动学和动力学特征来分析、推断地下介质结构和物性特征。由于其探测深度有限，探测结果具有定性表征，只适合道路地下病害定期排查<sup>[18~20]</sup>。钻孔取心方法，工程量大，病害道路路面一般均为破碎体，取心很难获得标准试样，城市路基大多为土体或胶合体，遇水取心成型困难，且耗资严重，影响交通正常运行，不适合现代城市道路发展要求<sup>[21]</sup>。目前，对于城市道路塌陷危险区路基疏松病害精细诊断方法和技术均存在不足之处，成为制约交通安全的重要因素<sup>[22, 23]</sup>。

国内外道路地下岩土体病害探查手段主要包括探地雷达法、多道面波法、高密度电阻率法、基于 ohm mapper 的电阻率成像法、静力触探试验、扁铲侧胀试验、旁压试验等。代表性的设备有：美国（Geophysical Survey Systems, Inc.，GSSI）公司的 SIR [intelligence（情报）、surveillance（监视）、reconnaissance（侦查）] 系列、瑞典 MALA 公司的（random access method of accounting and control, RAMAC）系列和加拿大探头及软件公司的 PulseEKKO 系列；英国某公司通过先进的活塞取样器取得芯样，通过多次试验对取样过程中钻管的抗拔力与芯样体强度的关系进行了研究；巴西圣保罗大学提出了基于试验强度和纵波传播速度的原位单轴抗压强度估算方法，并将该方法应用于巴西南部等地区的样本中；交通部公路科学研究院公路养护管理研究中心开发了路况快速探测系统装备，可同时探测路面损坏、道路平整度、前方图像及路面车辙 4 项技术指标，实现对道路路况快速、无损探测；香港大学研制钻孔过程监测系统（drilling process measurement, DPM），测试转动动力，评价岩体质量<sup>[24~30]</sup>。

探地雷达法、多道面波法、高密度电阻率法、基于 ohm mapper 的电阻率成像法存在的共性问题：判别标准差别大，探测成果定性，适合普查，不宜作为定量探查；静力触探试验、扁铲侧胀试验、旁压试验适合于土体病害量化探测，但取样探查工程量大、数据滞后，现有原位探查技术探测物理量单一、采集方式

靠人工手动、未实现多参量标定密实度,测试效果时效性和准确性均有待提高。

### 1.3 地下病害定量精细探测技术研究现状

在道路地下病害探测诊断技术方面,国内外开展了许多研究工作,并应用在道路地下病害普查和排查工作中。但以往测试方法均针对具体工程或参数所提出的,存在一定局限性,测试数据具有滞后性,并且对道路造成不同程度的破坏;在地下病害定量诊断方面,虽然雷达探测给出了相应的密实或疏松结果,但仍是定性分析的结果,至今在地下病害探测上,未见对病害定量诊断的方法。因此,发展适合现代交通安全和快速准确量化病害诊断技术势在必行。

综上所述,对国内外地下岩土体强度及病害探查现状分析可知,目前,国内外地下岩土体探查整体上以探地雷达等无损探测技术为主,以钻孔取心、标准贯入、静力触探等有损探查技术为辅,探查深度一般为3~5m,探查结果为雷达测线定性图谱,在探查结果快速定量化、数字化方面存在不足。由于多物理量、自动化、高精度的旋压触探数字化原位探查技术在探测深度、探测精度和适用范围方面具有先进性,已成为地下岩土体强度及病害定量探查技术发展的主要趋势。

## 第 2 章 道路地下病害及塌陷发生机理

道路地下病害从孕育、发展到发生经历了长期过程，只有从内因和外因两个方面出发，才能对病害发展的状况及病害的起因掌握清楚。本章主要通过对道路地下病害类型的分析，找到地下病害的病源，进而对道路地下病害诱发塌陷进行研究，分析道路地下塌陷机理，为下一步道路地下病害探测方法及其优化提供基础依据。

### 2.1 道路地下病害类型

公路及城市道路路基病害主要有以下形式<sup>[31~35]</sup>。

#### 2.1.1 基层

高速公路的半刚性基层厚度多在 20cm 左右，采用水泥稳定碎石(或砾石)或石灰粉煤灰稳定碎石(或砾石)。半刚性底基层厚 20~40cm，采用的材料有石灰土、水泥土、二灰土、二灰砂、二灰和水泥石灰土等。半刚性材料层的总厚度通常不超过 60cm，最薄为 40cm。

半刚性材料路面的承载能力取决于半刚性材料层的质量和厚度等因素，如果基层或底基层质量不好或均匀性小，不能形成一个完整的整体，容易导致沥青路面产生局部破损。在路面设计和施工都符合要求的情况下，半刚性路面的结构性破坏常发生在行车道的轮迹带上。在轮迹带上先产生纵向细小裂缝，而后产生通过轮迹带的横向裂缝，最后发展成网裂和形变。

#### 2.1.2 岩土地基

填土路堤路基产生纵向不均匀沉降，使路面顶面产生波滚式的不平整。其产生沉降的原因：一是原土地基产生固结变形，在填筑路堤之后，地基受到加载作用，产生压缩变形。二是路堤本身产生固结变形，是与填土高度、土的性质和压实度密切相关的。(图 2.1、图 2.2)。



图 2.1 路基纵向不匀沉降示例图



图 2.2 桥头跳车示例图

路基压实度不够产生的纵向裂缝由于地基和填土在槽向不可避免的不均匀性，特别是在有表面水渗入地基的情况下，沥青路面和水泥混凝土路面或早或迟都会产生一些细而短的纵向裂缝。

桥头跳车是由路基路面沉降引起的，是路基路面纵向变形最严重的一种形式。它是由于桥头填土较厚，路基路面容易产生大的沉降，而桥头的沉降量很小，从而产生错台高差。这种现象在软基路段、湿陷性黄土地区尤为严重。

### 2.1.3 特种土层的路基

淤泥质黏土、红黏土等软土地基往往因固结沉降稳定时间长，或是因修路微型水文地质条件发生了改变，从而引起路面沉陷。湿陷性黄土路基：在地下水的作用下老的空穴增大，并发生新的空穴。

## 2.2 地下塌陷危害及类型

地基位于(或存在)不良地质体，如滑坡、空穴，由于高速公路的修建改变了微地貌环境，水地质条件、工程地质条件均发生了变化，在持续动荷载作用下，原有的不利地质条件被进一步激发、扩大，从而引起路面沉陷、裂缝，甚至大范围的路基塌滑<sup>[36]</sup>，如图 2.3~图 2.5。比如高边坡开挖引起地下水位浸入路基(图 2.3)；高速公路位于古滑坡体上，路基的一部分位于滑动面上，在动荷载作用下，引发路基边坡大范围失稳(图 2.4)和路基深部的空穴，在路基填土的压力和车辆动荷载作用下发生沉陷，引起路面沉陷(图 2.5 和图 2.6)。

将路面破损和路基病害成因类型对应分析，能够发现它们相互作用、相互影响。道路地下病害会引起路面破损，而路面破损又加快了地下病害的产生和发展，表现为地下岩土体压实度减小、含水量增大、裂缝松散体的产生。

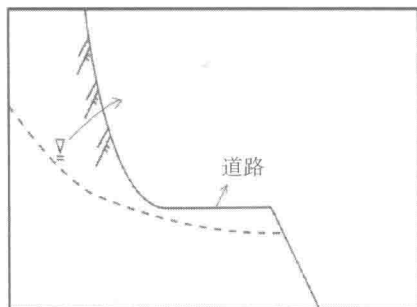


图 2.3 地下水位浸入路基图

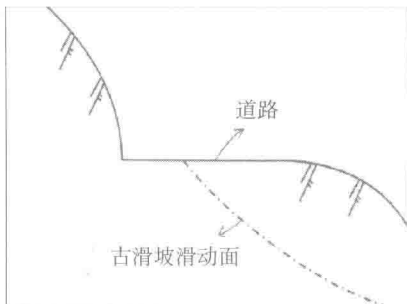


图 2.4 路基边坡大范围失稳示意图  
(道路位于古滑坡体上, 在动荷载作用下, 可能引发路基边坡大范围失稳)

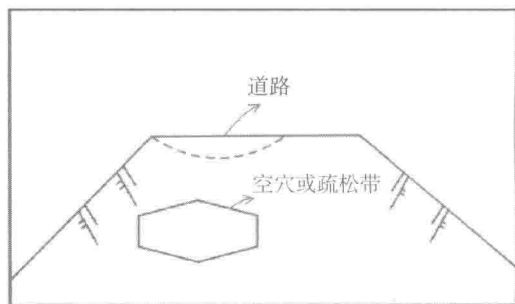


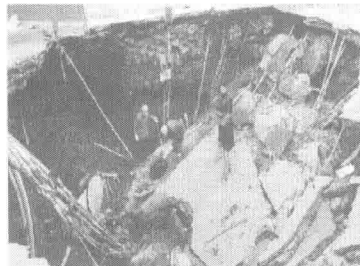
图 2.5 路基深部的空穴引起路面沉陷示意图



(a) 北京市西城区里仁街塌陷



(b) 北京市海淀区学院路塌陷



(c) 南京市道路塌陷



(d) 上海市浦东新区道路塌陷

图 2.6 道路地下塌陷实例

## 2.3 道路地下塌陷机理

从图 2.6 的实例可以看出,道路塌陷均呈“扇状 V 形”分布,且均向下沉<sup>[37, 38]</sup>,说明路基内部有空洞空间,随着空洞的逐渐增大,空洞边界作用力斜向上发展,上方道路面层承受面受力增加,作用力也增大,当道路面层承载力超过其极限载荷时,在微扰动作用下发生道路塌陷。

道路地下塌陷从孕育、发展到发生的过程可描述为:城市地下工程施工卸荷后,产生松散、松动甚至脱空,进而延伸至道路路基,使得路基疏松;在长期压载荷、水平载荷以及水共同作用下,逐渐形成局部空洞,多种因素耦合作用使得疏空范围随时间延长继续扩大,并可能形成水囊,疏空上方较坚硬基层在承受上方路面各类载荷作用,及承受弯、剪作用的同时,还受到水平动载及外部复杂环境的影响,当坚硬基层受力达到极限状态时,任何微小扰动都会导致其发生断裂失稳而造成路面塌陷<sup>[39, 40]</sup>。同样,在塌陷截面上形成类似“扇状 V 形”坑。



## 第3章 地下病害探测方法及优化

地下病害探测最常用的方法有地质雷达探测法、地震映象探测法和地质钻孔取心法。各种方法均有其优势和适用性。针对某一具体工程问题需要对地下病害进行合理选择,采取单一方法或两种方法,或组合方法。这样,就可以解决具体工程问题,满足既经济又可靠的要求。本章针对地下病害探测方法及合理优化展开分析,以为下一步优选合理探测方法提供理论指导。

### 3.1 地质雷达探测法

探地雷达技术(ground-penetrating radar, GPR)是一种高新技术的地质雷达勘测探测技术(图3.1)。它以快速、经济、较为准确地连续反映空间体的独特优点逐步代替笨重、速度慢、费用高的钻探芯取样方式<sup>[41~43]</sup>。

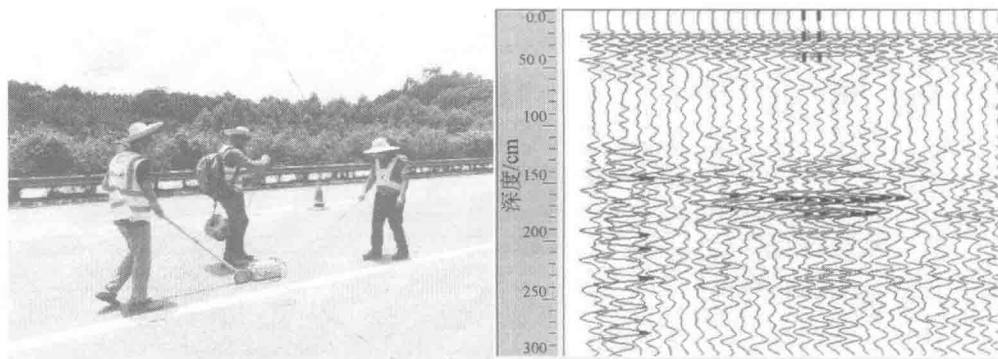


图3.1 探地雷达探测

(1) 该技术适用于路面基层或路堤中问题的探测脱空识别,裂缝和裂缝的扩展,沥青层的剥落识别、脱空、沉陷、含水量偏高等。另外,还可以适用于道路施工和竣工后探测维修的全过程对路面各种结构层厚度的探测与评价。

(2) 地质雷达通过对路面以下扫描,可适用于探测10.30m范围有效深度空间。该方法不仅可探测黄土陷穴及潜蚀洞穴、古墓,还可探测石灰岩地区浅部溶洞及地下暗河。